

Analyse du comportement thermique aux interfaces des composants électroniques

Maha Ayache^{1,2}, Mohamed Hamraoui^{1*}, Najib Laraqi²

¹ Université Hassan II Casablanca, EST, Laboratoire RITM, Km 7, Route El Jadida, BP. 8012 Oasis, Casablanca, Maroc

² Université Paris Ouest, LTIE, EA 4415, GTE, 50 R. de Sèvres, 92410 Ville d'Avray, France

* auteur correspondant: Prof. M. Hamraoui (hamraoui@hotmail.com)

Résumé : Les composants électroniques sont de plus en plus miniaturisés et reçoivent des puissances de plus en plus élevées. Ces conditions de fonctionnement posent de grands problèmes thermiques, qui conduisent dans certains cas à une dégradation progressive de leurs performances et à une diminution de leur durée de vie. Cette étude vise à analyser le comportement thermique à l'interface des composants électroniques multicouches en observant l'évolution de la résistance thermique de contact entre couches. Le dispositif étudié est constitué de trois couches: deux possédant des dimensions et caractéristiques thermiques identiques, la troisième, considérée fine, est insérée entre les deux précédentes et a des propriétés différentes.

Mots clés: Composants électroniques; Interfaces; Identification; Méthodes inverses; Résistance thermique de contact.

1. Introduction

La température joue un rôle important dans le comportement des composants électroniques. En effet, ces derniers sont de plus en plus miniaturisés tout en recevant des puissances de plus en plus accrues. Ces conditions de fonctionnement conduisent dans certains cas à la réduction de leur durée de vie. Dans cette étude, on s'intéresse aux composants multicouches où un autre facteur intervient dans leur dégradation. Il s'agit du comportement interfacial dû à l'imperfection du contact entre couche. C'est souvent le lieu le plus exposé à la défaillance de la structure du composant électronique multicouches.

L'objet du travail présenté dans cet article est l'analyse du comportement thermique aux interfaces des composants électroniques, représentées par des résistances thermiques de contact. Ce paramètre physique a été largement étudié dans la littérature tant au plan microscopique que macroscopique [1-6].

Il convient de souligner que le calcul de ce paramètre est délicat à effectuer à cause de la difficulté d'accès à l'interface, raison pour laquelle plusieurs études ont été menées dans le but de l'identifier avec des modèles inverses.

Le comportement thermique d'un composant électronique multicouches a été étudié par Vintrou et al. [7-8] dans le cas d'une sollicitation fréquentielle. Les auteurs ont établi des graphes Nyquist présentant l'impédance thermique en fonction des paramètres géométriques et physiques des matériaux utilisés. Dans cette étude, les auteurs ont considérés des résistances thermiques interfaciales constantes.

Cette contribution présente une étude numérique portant sur l'identification des résistances thermiques qui évoluent brusquement au cours du temps des suites d'une défaillance au niveau des interfaces du composant.

2. Simulations directe et inverse du comportement thermique du composant

Considérons une couche conductrice fine (Figure 1, couche 3) insérée entre deux couches (couche 1 et couche 2). Les dimensions et propriétés thermiques des couches (1) et (2) sont identiques et différentes de celles de la couche (3). Les contacts entre les couches sont imparfaits. Les faces latérales sont isolées de sorte à considérer que le transfert de chaleur est unidirectionnel.

Pour pouvoir effectuer les simulations, nous procédons en deux étapes:

Etape 1: On effectue une modélisation directe simple, 1D transitoire, qui nous permet de générer les températures nécessaires à l'identification des résistances thermiques de contact de l'étape 2. Pour ce faire, on considère que les 3 couches sont à une température initiale identique donnée, et on applique deux conditions aux limites de type échanges convectifs avec des températures différentes, de sorte à générer un gradient de température dans le système. Les 2 résistances thermiques interfaciales sont constantes et, à un instant donné, on leur fait subir un saut brusque pour simuler une avarie de la structure. Durant cette étape de modélisation directe, on enregistre 6 températures: 2 températures dans la couche (1), 2 températures dans la couche (2) à des abscisses situées à une certaine distance de chaque interface, et les 2 températures surfaciques de la couche (3).

Etape 2: On procède à une modélisation inverse en utilisant les températures mesurées dans les couches (1) et (2). Pour ce faire, on adopte une technique de retour vers la surface [9]. Celle-ci nous permet d'accéder aux températures et flux surfaciques interfaciaux respectivement côté couche (1) et (2). Connaissant par ailleurs les températures surfaciques de la couche (3), on déduit les résistances thermiques de contact des interfaces (1)/(3) et (2)/(3) et on les compare à celles imposées dans le modèle direct.

2.1. Modèle direct

Initialement les 3 couches sont à la température T_i uniforme. On applique ensuite des conditions d'échanges convectifs sur les faces libres des couches (1) et (2). Les interfaces (1)/(3) et (2)/(3), considérées imparfaites, sont modélisées par des résistances thermiques de contact.

La diffusion de la chaleur dans les différentes couches est classique, et est régi par les équations suivantes:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} &= \frac{1}{\alpha_j} \frac{\partial T_j}{\partial t}; \quad (j = 1, 2, 3) \\
 T_j(z, 0) &= T_i; \quad (j = 1, 2, 3) \\
 -\lambda_j \vec{\nabla} T_j \cdot \vec{n}_j &= h_j (T_j - T_{a,j}); \quad (j = 1, 2) \quad (z = 0, z = e_1 + e_3 + e_2) \\
 -\lambda_j \vec{\nabla} T_j \cdot \vec{n}_j &= (T_j - T_3) / RC_{j3}; \quad (j = 1, 2) \quad (z = e_1, z = e_1 + e_3)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Dans ce système d'équations, λ représente la conductivité thermique, α la diffusivité thermique, h le coefficient d'échange convectif appliqué à chaque face libre des couches (1) et (2), T_a les températures ambiantes correspondant à ces échanges convectifs, \vec{n} la normale sortante, et RC la résistance thermique de contact.

Le système d'équations (1) est résolu numériquement par l'utilisation d'une technique classique de volumes de contrôles.

2.2. Modèle inverse et identification des RC

Pour la démarche d'inversion, nous avons adopté la méthode de retours vers la surface [9]. Celle-ci consiste à diviser le domaine (chacune des couches 1 et 2) en deux zones (Figure 2) : la zone directe, délimitée par les points de mesures, et la zone inverse, située entre le premier point et la surface de contact. La première étape de la méthode consiste à résoudre l'équation de la chaleur pour obtenir le champ de température à chaque point du domaine situé entre les deux points de mesure (zone directe). La seconde étape est le calcul par inversion du flux et température à la surface de contact.

Dans la zone directe le système se résume à un problème classique de conduction de la chaleur avec des températures imposées comme conditions aux limites.

Dans la zone inverse on applique une technique de retour vers la surface [9]. Celle-ci consiste à discrétiser l'équation de la conduction de la chaleur pour un volume de contrôle d'épaisseur Δz_i centré autour du noeud i à un instant quelconque n par l'équation suivante:

$$\rho c \Delta z_i \frac{T_i^{n+1} - T_i^{n-1}}{2 \Delta t} = -\phi_{i+1/2}^n + \phi_{i-1/2}^n \quad (2)$$

Pour introduire la notion de températures futures, la densité de flux $\phi_{i+1/2}^n$ est remplacée par sa moyenne arithmétique aux instants $n-1$ et $n+1$, si bien que l'équation (2) devient

$$\rho c \Delta z_i \frac{T_i^{n+1} - T_i^{n-1}}{2 \Delta t} = -\frac{\phi_{i+1/2}^{n+1} + \phi_{i+1/2}^{n-1}}{2} + \phi_{i-1/2}^n \quad (3)$$

En discrétisant les densités de flux, l'équation (3) devient :

$$\rho c \Delta z_i \frac{T_i^{n+1} - T_i^{n-1}}{2 \Delta t} = -\frac{1}{2} \left[-\lambda \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta z_i} - \lambda \frac{T_i^{n-1} - T_{i+1}^{n-1}}{\Delta z_i} \right] - \lambda \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta z_i} \quad (4)$$

On extrait de l'équation (4) la température T_{i-1}^n sous la forme:

$$T_{i-1}^n = T_i^n + \frac{\rho c \Delta z_i^2}{2 \lambda \Delta t} [T_i^{n+1} - T_i^{n-1}] + \frac{1}{2} [T_i^{n+1} - T_{i+1}^{n+1} + T_i^{n-1} - T_{i+1}^{n-1}] \quad (5)$$

L'équation (5) s'applique aux noeuds i allant de celui du point de mesure le plus proche de l'interface jusqu'au noeud $i = 2$. Ceci permet d'obtenir la température surfacique T_1^n des couches (1) et (2) côté interface.

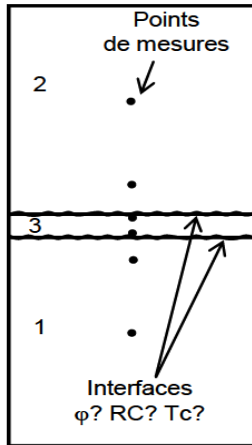


Figure 1 : Dispositif étudié

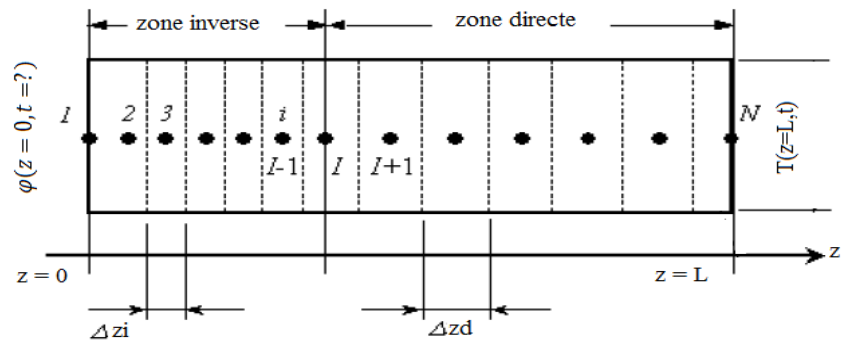


Figure 2 : Schéma de l'inversion

Pour déterminer la densité de flux entrant dans les couches (1) et (2) au niveau des interfaces, on effectue un bilan thermique sur la demi-maille adjacente à l'interface, supposée centrée autour du noeud $i = I$ sous la forme suivante:

$$\phi_I^n = \rho c \frac{\Delta z_i}{2} \left[\frac{T_I^{n+1} - T_I^{n-1}}{2 \Delta t} \right] + \lambda \left[\frac{T_I^n - T_2^n}{\Delta z_i} \right] \quad (6)$$

On déduit ensuite la résistance thermique de contact RC en utilisant la relation qui la définit, telle que:

$$RC_{j3} = \frac{T_3 - T_j}{\varphi_j}; (j = 1, 2) (z = e_1, z = e_1 + e_3) \quad (7)$$

Dans l'équation (7), φ_j est donné par la relation (6), T_3 est la température surfacique de la couche (3), donnée par des mesures, et T_j la température surfacique de chacune des couches (1) et (2) au niveau des interfaces, déterminée par inversion à partir de l'équation (5).

3. Résultats et discussions

Nous présentons les résultats obtenus pour des couches ayant les caractéristiques géométriques et thermophysiques résumées dans le Tableau 1. Ce même tableau contient les données des simulations numériques: z_j et z_k désignent respectivement la distance la plus rapprochée et la plus éloignée des points de mesures dans les couches (1) et (2) relativement à chaque interface. Le nombre de mailles dans les zones directe et inverse sont respectivement notés N_d et N_i . Les positions des capteurs (z_j, z_k) et le nombre de mailles (N_d, N_i) ont fait l'objet d'une étude préalable de sensibilité de sorte à allier précision des résultats et réduction des temps de calcul. Les valeurs optimales ainsi déterminées sont consignées dans le Tableau 1.

	e	λ	α	h	T_i	T_a	N_d	z_j	z_k	N_i	Δt
Couche (1)	0,01	50	$5 \cdot 10^{-6}$	1000	50	100	40	0,0025	0,0075	20	1
Couche (2)	0,01	50	$5 \cdot 10^{-6}$	1000	50	50	40	0,0025	0,0075	20	1
Couche (3)	0,001	100	$1 \cdot 10^{-6}$	-	50	-	10	-	-	-	1

Tableau 1 : Caractéristiques des 3 couches et données numériques (unités: SI)

Dans une première simulation nous avons considéré une résistance thermique de contact constante et identique pour les deux interfaces. La valeur adoptée est $RC_{13} = RC_{23} = 10^{-5} m^2.K/W$. Les résultats de l'identification sont reportés sur la Figure 3. On peut noter une excellente concordance entre la valeur identifiée et la valeur exacte introduite dans le modèle direct. Les écarts relatifs sont de l'ordre de 0,2%.

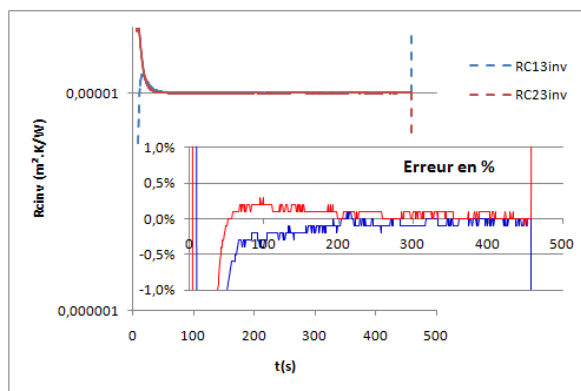


Figure 3 : Résultat de l'identification avec une RC constante

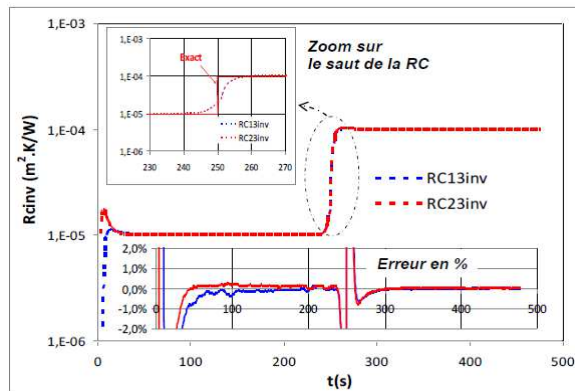


Figure 4 : Identification de la RC avec un saut

Dans une seconde étape nous avons opéré une variation brusque de la valeur de la RC à $t = 250s$ en passant de $RC_{13} = RC_{23} = 10^{-5} m^2.K/W$ à $RC_{13} = RC_{23} = 10^{-4} m^2.K/W$ pour les deux solides. La Figure 4 présente les résultats des comparaisons entre les valeurs exactes et celles identifiées. Les résultats obtenus

montrent que l'identification reproduit fidèlement cette variation de la RC. Les erreurs sont relativement faibles (inférieures à 1%). Le zoom au voisinage du saut de la RC montre quelques écarts qui sont dus au temps de réponse des capteurs situés à une certaine distance de l'interface. Ces écarts s'échelonnent ici sur une courte durée (de l'ordre de 5 s). Ils peuvent être réduits en rapprochant les points de mesures des interfaces et/ou en peaufinant le maillage spatiotemporel.

Conclusion

Dans un objectif de détection de défauts dans un composant électronique multicouches, nous avons proposé une méthodologie basée sur l'examen in-situ des résistances thermiques de contact RC. La méthodologie d'identification des RC s'avère pertinente, puisque les simulations effectuées ont permis de reproduire des variations brusques de celles-ci. Cette méthode peut être élargie à d'autres applications telles que les structures mécaniques composites. Ce travail se poursuit actuellement par la réalisation d'expériences réelles sur des dispositifs disponibles au laboratoire.

Nomenclature :

c	Capacité thermique spécifique, J/kg.K	Symboles grecs	
e	Épaisseur, m	α	Diffusivité thermique, m ² /s
h	Coefficient d'échange, W/m ² .K	λ	Conductivité thermique, W/m.K
N	Nombre de mailles	ρ	Masse volumique, kg/m ³
RC	Résistance thermique de contact, m ² .K/W	φ	Densité de flux, W/m ²
T	Température, °C	Δt	Pas de temps, s
T_a	Température ambiante, °C	Δz	Pas d'espace, m
T_i	Température initiale, °C	Indices inférieurs	
t	Temps, s	1,2,3	Relatifs aux couches (1), (2), (3)
z	Variable d'espace, m	Indices supérieurs	
		n	Relatifs au temps

Références

- [1] J.P. Bardon, Heat transfer at solid-solid interface: basic phenomenon, recent works, *Proceedings of Eurotherm*, Nancy, France, vol. 3, pp. 39-63, 1988.
- [2] A. Degiovanni, C. Moyne, Résistance thermique de contact en régime permanent. Influence de la géométrie du contact, *Revue Générale de Thermique Fr*, vol. 223, pp. 446-452, 1989.
- [3] N. Laraqi, A. Baïri, Theory of thermal resistance between solids with randomly sized and located contacts, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 45, issue 20, pp. 4175-4180, 2002.
- [4] M. Hamraoui, Thermal behaviour of rollers during the rolling process, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp 2386-2390, 2009.
- [5] M. Hamraoui, T. Osman, A. Boucheffa, M.M. Rashidi, Analytical modelling of the three-dimensional steady-state temperature in a bearing ring, *Mecanique & Industrie*, vol. 12, pp. 1-4, 2011.
- [6] M. Hamraoui, Z. Zouaoui, Modelling of heat transfer between two rollers in dry friction, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, issue 6, pp. 1243-1246, 2009.
- [7] S. Vintrou, N. Laraqi, A. Baïri, Thermal impedance of multi-finger microelectronic structures: Exact analytical model, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 42, Issue 24, Article number 245501, 2009.
- [8] S. Vintrou, N. Laraqi, A. Baïri, Calculation and analysis of thermal impedance of microelectronic structures from analytical models, *Solide-State Electronics*, Vol. 67, Issue 1, pp. 45-52, 2012.
- [9] M. Raynaud, J., Bransier, Experimental Validation of New Space Marching Finite Difference Algorithm for Heat Conduction Problem, *Proc. of Eight Int. Heat Transfer Conf.*, San Francisco, 1986.